

# MODELACIÓN CALIDAD DE SITIO EN PLANTACIÓN JUVENIL DE TECA

## MODELINGLY QUALITY OF SITE IN JOUNG PLANTATION OF TEAK

Nohelia Bedoya Velásquez

Trabajo de grado para optar al título Ms Bosques y Conservación ambiental

Asesor: Rodolfo Hernán Parra Sánchez MSc: Silvicultura y Manejo de Bosques

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales, 2014

### Abstract

Under the concept "sustainable management in forest plantations" previous sowing a teak *Tectona grandis* plantation on an agro-forest field in the north part of The Urabá Chocoano, Caribbean coast in Colombia South America, qualification of site was done by indirect method (topography, edaphology and climate) identifying it suitable to use. Monitoring young stage growth started one and a half year after sowing by establishing 31 round sample plots of 300 m<sup>2</sup> under quality of site stratification criterion. Gathered data during four years were used to calculate the S.I. with the Schumacher and Korf equations. The return showed R<sup>2</sup> of 67.2446% for Schumacher, 67.5393% for Korf and (67, 4306%) for Richard y Chapman, the paired sample comparison was not significantly different. The resulting S.I. curves at a base age of twelve years old indicated with Korf a mean dominant height of 22.62 m on the best sites, and 12.57 m on the worst sites, Schumacher a mean dominant height of 19,94m on the best sites, and 11.80 m on the worst sites and Richard y Shapman a mean dominant height of 22.28m on the best sites, and 13,25m on the worst sites. Comparison of Korf's S.I. ranges with those reported by Torres, Del valle and Restrepo in 2011 in the Caribbean region of Colombia (S.I. 24.7 and 9.8m accordingly) placed the estimated values within these ranges. The analysis in each plot showed the same behavior.

Key words: Teak, site index, growth modeling, sustainable management.

### Resumen

Bajo el concepto, manejo sostenible de plantaciones forestales, previo a la siembra de teca en zona de uso agroforestal en el norte del Urabá Chocoano, Costa Caribe, Colombia, Sur América se realizó la calificación de sitio por método indirecto (topografía, edafología y clima), identificándose buena aptitud de uso. El monitoreo del crecimiento en la etapa juvenil inició a año y medio de edad con el establecimiento de 31 parcelas circulares de 300m<sup>2</sup>, bajo el criterio de muestreo estratificado por calidad de sitio. Los datos recabados durante cuatro años, se utilizaron para el cálculo de IS con las ecuaciones de Schumacher, Korf y Richard-Chapman. Las regresiones arrojaron estadígrafos de R<sup>2</sup> Schumacher (67,2446%), Korf (67,5393%) y Richard-Chapman (67,4306%), la comparación para muestras pareadas indicó no diferencia significativa entre los dos últimos modelos. Los resultados para edad de referencia (12 años) en la familia de curvas IS promedio indican con Korf un límite superior 22,62m. e inferior 12,57m., Schumacher 19,94m y 11,80m. y Richard-Chapman 22,28m y 13,25m. La comparación de los rangos IS Korf con los hallados por (Torres, Delvalle y Restrepo, 2011) región Caribe Colombia, IS superior 24,7 metros e inferior 9,8m., ubica los valores estimados al interior de estos niveles. El análisis por parcela presentó igual comportamiento.

Palabras Clave: Teca, índice de sitio, modelación crecimiento, manejo sostenible.

## Introducción

Revisado el conocimiento sobre, calidad de sitio o calidad de estación e índice de sitio, es evidente la suma importancia del indicador para el diseño, establecimiento y manejo de plantaciones forestales, bajo el concepto de sostenibilidad. De acuerdo con (Camino, 2013) el manejo forestal sostenible en plantaciones de teca, es incipiente, los ciclos de corta inciertos y la sostenibilidad de plantaciones a gran escala tiene que vencer grandes dificultades.

El índice de sitio empleado tradicionalmente, para la selección de sitio antes de establecer el bosque, como indicador del crecimiento de las plantaciones con base en los árboles dominantes, para la determinación de actividades de raleo o entresacas y en investigaciones como ejercicio académico, tiene una escasa aplicación como modelo para manejar plantaciones en el ámbito empresarial.

Durante la planeación, establecimiento, seguimiento y manejo de una plantación de teca en el norte del Urabá Chocoano Colombia, se tuvo como referente continuo las diferentes utilidades del concepto "calidad de sitio", posibilitando durante la fase juvenil la modelación del crecimiento del bosque, etapa clave para garantizar el adecuado desarrollo en relación con las variables ambientales limitantes y como garantía para la prevención de problemas futuros.

La selección de la especie a sembrar, se realizó por modelación de la calidad de sitio antes de plantar, aplicando métodos descriptivos, cualitativos y cuantitativos. Posteriormente al año de siembra se implantaron parcelas para la medición del crecimiento en altura y diámetro por un periodo de cuatro (4) años y se realizaron muestreos temporales en plantaciones de 6 y 9 años de edad, finalmente a través de modelación matemática y estadística se hallaron las familias de curvas por parcela y promedias que permiten determinar con precisión la calidad de sitio para teca en esta zona de Colombia.

En plantaciones forestales regularmente se efectúa el proceso de modelación a partir de cuatro años de edad, justificado en disminuir costos al seguimiento y la incidencia del manejo silvicultural intensivo sobre el crecimiento de los árboles juveniles, que contrarresta los posibles efectos de la calidad de sitio. Incluso en los procesos de modelación del

crecimiento se tiende a eliminar los datos de esta etapa por efecto de distorsión en el ajuste a las ecuaciones de crecimiento e incremento de márgenes de error; sin embargo en la práctica el resultado final, la madera para aserrío se fabrica en edad temprana, siendo trascendental el monitoreo de la respuesta de crecimiento con respecto a la calidad de sitio en esta fase de desarrollo del bosque, antes de que se inicie el ciclaje de nutrientes que contribuye a la autosostenibilidad en el largo plazo.

Con respecto al anterior planteamiento, el presente trabajo sustenta la importancia del uso de la modelación de la calidad de sitio, con el fin de realizar el monitoreo sistemático del desarrollo juvenil en plantaciones de teca, dado que en este ciclo se pueden ejecutar intervenciones a variables ambientales controlables, propiciando mejores resultados en el crecimiento y rendimiento. De hecho la diversidad de sitios en tierras tropicales dificulta disponer de predios con características ambientales homogéneas, complicándose el tratamiento estándar para el desarrollo óptimo de plantaciones forestales. Desde esta óptica la investigación presenta como valor agregado una metodología para realizar la modelación del crecimiento en la etapa juvenil de las plantaciones.

El manejo de la plantación se realizó con base en tratamientos silvícolas recomendados para la especie y requerimientos asociados con la calidad de sitio determinada antes del establecimiento, especialmente fertilización a edad temprana.

La modelación de la calidad de sitio y el índice de sitio ajustados para esta zona, generan información complementaria a investigaciones sobre el cultivo de teca en la región Caribe de Colombia.

## Descripción general y distribución de la Especie

Familia verbenácea, predominantemente tropical y subtropical, el género presenta tres especies, *T. grandis*, *T. hamiltona* y *T. Philippinensis*. Se distribuye naturalmente en el sudeste de Asia, extendida a India, Tailandia hasta las Filipinas (Zuhaidi y otros, 2011). La teca fue cultivada por fuera de su lugar de origen en Trinidad y Tobago desde donde se propagó por el trópico y subtropico americano.

Especie arbórea, frondosa, decidua, de gran valor comercial que alcanza hasta 30 metros de altura. Se

la denomina, la Reina de las Maderas debido al brillo y contraste del color (verde oliva y clara) y la resistencia al daño cuando entra en contacto con los metales, la hace valiosa para la elaboración de muebles y embarcaciones lujosas.

Los bosques naturales de teca en el mundo se ubican en Burma (Myanmar), Tailandia, Laos e India, estos bosques han sido explotados hasta ponerlos al borde de la extinción. La distribución por el trópico inició hace varios siglos en Java y algunas islas del archipiélago de Indonesia y posteriormente a las Filipinas, con el paso del tiempo se constituyeron en recurso natural. A finales del siglo diecinueve las plantaciones de teca se extendieron a otras regiones tropicales y subtropicales. En la región Caribe las plantaciones se establecieron desde el año 1913 (Weaver, 2000).

Según (FAO 2010) en el mundo existen alrededor de 3.6 millones de Ha plantadas con teca, por región realizó el siguiente reporte Tabla 1.

Tabla 1. Reporte mundial de área plantada en teca

Región	Reporte por ciudad	1000 Ha	%
África	8/20	460	13
Asia	10/16	2,880	80
Caribe y Centro América	11/17	130	4
Sur América	5/8	122	3
Mundial	34/61	3,592	100

Hacia el año 1940, llegó a Colombia la primera semilla. En 1946 se sembraron algunos arbolitos en la estación Calima y posteriormente fue propagada en zona bananera del Magdalena, Actualmente el cultivo se desarrolla preferiblemente en la costa Caribe departamentos de Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar. La adaptación a características climáticas de bosques secos y húmedos de la cuenca del mar Caribe originó la inversión privada en plantaciones homogéneas y como programa de gobierno se ha incorporado en proyectos agroforestales.

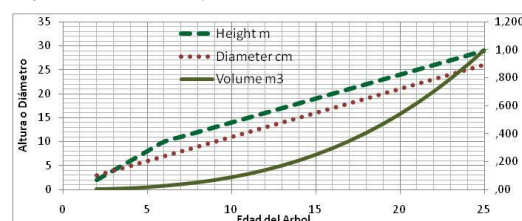
Datos parciales para Colombia DANE (2003 -2006) muestran en el departamento del Magdalena 34 rodales (1427.94ha), Córdoba 192 rodales (4.890,30 ha), el censo en Antioquia, se presenta en datos globales "Otras especies" 629 rodales y 9.361,81 ha.

### Crecimiento y rendimiento promedio mundial y Colombia

Durante el año 2009, la Empresa de Bosques Fusttal S.A. con base en datos promedios del rendimiento

de la teca en el ámbito mundial, elaboró la (Fig.1), rendimientos máximos a alcanzar en proyectos de reforestación con teca, bajo condiciones ambientales óptimas y manejo intensivo en la adecuación y fertilización de los suelos.

Figura1. Crecimiento y rendimiento, promedio mundial Fusttal 2011



La teca en estado juvenil tiene un rápido crecimiento y decrece con el desarrollo de la plantación. (Ladrach, 2009) plantea que a pesar del largo tiempo que lleva el desarrollo de plantaciones con la especie, se carece de información confiable sobre crecimiento y productividad, reporta los siguientes datos de rendimiento en el ámbito mundial:

Norte de Gana: En los mejores sitios 14m³/ha/año a los 24 años y con alturas de 20m., en sitios de segunda clase las tasas son de 9m³/ha/año a los 24 años con alturas de 15m.

Myanmar: Las entresacas producen entre 12 y 17m³/ha con un ciclo de 30 años.

Trinidad: Las curvas de crecimiento siguen un patrón similar al de los pinos tropicales, con ciclos de cultivo entre 15 y 25 años de edad. En turnos cortos el IMA a la edad de cosecha puede estar entre los 10 y 15m³/ha/año.

Costa Rica: Se observa que el turno de producción depende de la calidad del sitio, de los diámetros de trozas deseados y de consideraciones financieras. Para sitios de calidad media a buena se estiman turnos de 20 a 25 años con tasas de retorno a 25 años, hasta el 12%, turnos mayores no son rentables.

En síntesis (FAO, 2010) presenta tasas de IMA y su respectivo periodo de rotación para las diferentes regiones del mundo. Tabla 2.

Tabla 2. IMA y rotación plantación mundial, por regiones

Región	(IMA m³/ha/año)		Rotación (años)	
	Min	Max	Min	Max
África (5)	3	21	4	60
Asia (5)	2	14	25	80
Caribe(3)	3	12	20	50
C. América (3)	8	16	20	25
Australia (8)	8	12	20	25
Suramérica (4)	10	27	20	30
Total	2	27	4	80

La reforestación en Colombia se realiza en tierras marginales para la agricultura, y/o áreas intervenidas con grandes impactos derivados del uso inadecuado en ganadería o agricultura (Ladrach, 2010). Con la alta variación de calidad de sitio en Colombia y la situación expresada por Ladrach, se considera que los rendimientos de la teca se encuentren en el rango de 8 a 25 m³/ha/año (Trujillo, 2009).

### Calidad de sitio

Este concepto, clave en la silvicultura sostenible de plantaciones forestales, tiene como base conceptual la definición de tres componentes:

**Sitio:** Lugar geográfico caracterizado por su fisiografía, suelo, vegetación y clima (Vallejo, 2012).

**Calidad de estación o calidad de sitio:** la capacidad que tiene un área determinada para inferir sobre el crecimiento en altura de los árboles (Lara, 2007). Se basa en la demostrada tesis de independencia entre crecimiento de los árboles y su densidad.

**Índice de sitio:** Medida cuantitativa de la calidad de sitio o indicador que representa en forma matemática y gráfica el crecimiento en altura de los árboles dominantes de una plantación en relación con su edad.

Los métodos para evaluar la calidad de sitio, se clasifican de varias formas en función de los criterios que se manejan para su estimación, en general se utilizan criterios ecológicos, dasométricos y aspectos florísticos. Los ecológicos incluyen elementos del clima, la topografía y del suelo que se correlacionan con el crecimiento de los árboles. Los criterios dasométricos estudian la producción de masas forestales en relación con la altura y el volumen maderable. El aspecto florístico se apoya en el estudio fitosociológico del medio donde se estableció el rodal. Con base en estos criterios los

métodos para evaluar la calidad de sitio se clasifican en directos e Indirectos (Alvarado y Raigosa, 2007).

### Métodos directos

Estos métodos requieren la existencia actual o pasada de la (s) especie(s) de interés y sus pertinentes mediciones y se puede realizar de tres formas diferentes:

- Estimación a partir de registros históricos del rendimiento
- Estimación con base en datos del volumen del rodal
- Estimación a partir de datos de la altura del rodal, índice de sitio (IS).

### Métodos indirectos

Los métodos indirectos no requieren de registro de mediciones acerca del rodal donde se va a determinar la calidad de sitio, igual que los métodos directos se clasifican de tres formas.

- Estimación a partir de relaciones entre especies del dosel superior
- Estimación a partir de las características de la vegetación menor
- Estimación a partir de factores edáficos, topográficos y climáticos

La estimación de la calidad de sitio, empleando el indicador IS, requiere de la elección de una edad de referencia, tradicionalmente se plantea que esta debe ser inferior o igual a la edad de rotación y debe ser un estimador fiable de la altura a otras edades. (Gonzales et al, 2004). Habitualmente se hace coincidir la edad de referencia con la culminación del crecimiento medio o con los dos tercios del turno de máxima renta.

### Variables ambientales y calidad de sitio e IS

La identificación de la calidad de sitio antes de establecer la plantación con base en factores edáficos, topográficos y climáticos, comprende el análisis de las variables altitud, temperatura, características fisicoquímicas del suelo y pendiente; las cuales se obligan a estar dentro rangos, para que la auto ecología de la especie exprese su potencial, fuera de esos rangos, las plantaciones no son comercialmente productivas (Camino, 2013). Se tiene identificado que la teca requiere de suelos profundos y bien drenados, crece en un PH cercano

a la neutralidad con precipitaciones sobre 1500mm y mínimo tres meses de estación seca. Según (Trujillo, 2009) los cultivos de teca se deben establecer bajo las siguientes condiciones ambientales:

Altitud: 0 – 1.000 msnm

Temperatura promedio anual: 22 – 27 °C

Precipitación: 700 – 3.000 mm. Desarrollo óptimo: 1.000 a 2.000mm y 3 – 4 meses secos.

Suelos: profundos, francos, bien desarrollados y aireados, aún más si son aluviales, con capacidad de adaptación a suelos pobres y suelos calcáreos con PH de 5 – 8, preferiblemente PH de 6.5 – 7, no tolera el agua estancada y la arcilla anaeróbica.

Pendiente: no mayor del 25%, en algunos casos se reporta plantar en pendientes alrededor de 40%, con buenos resultados.

Contenidos nutricionales limitantes: Los suelos no deben tener menos de 8 mili equivalentes por mililitro (meq-ml) de calcio o muy ácidos con alto contenido de hierro.

Características edáficas y crecimiento de la teca

(Witkan, 1971) expresa que, históricamente a causa de la obvia influencia del suelo en el crecimiento de las plantas, el factor edáfico continuamente ha tenido un espacio en la literatura ambiental. Las relaciones entre la flora y las características del suelo se lograron establecer con la introducción de las teorías de la química y física coloidal, que proporcionó nuevas bases para la ecología de las plantas. La saturación de bases, humus y arcillas expandibles explicaron mejor las diferencias del crecimiento de las plantas en comparación con el perfil de formación.

Para el desarrollo óptimo de la teca se plantea que el suelo debe ser profundo (1m de profundidad), con buen drenaje franco a franco arenoso, fértiles, con PH neutro o ligeramente ácidos, con alto contenido de calcio (Ca), fósforo (P), y magnesio (Mg) (Fonseca W, 2004).

Sin embargo Según (Krishnapillay, 2000) los primeros resultados de pruebas de crecimiento para

evaluar cultivos bajo una regulación óptima en diversos tipos de suelos y diferentes condiciones ecológicas, abonan la idea de que la teca puede prosperar en suelos problemáticos si se le prodigan las debidas atenciones. La calidad de su crecimiento, no obstante, depende de la profundidad, la estructura, la porosidad, el drenaje y la capacidad de retención de la humedad del suelo. El desarrollo es mejor en suelos profundos, bien drenados y fértiles, especialmente sobre substratos como suelos volcánicos o aluviales de diversos orígenes.

El pH óptimo del suelo es de 6,5 a 7,5. Su contenido de calcio es también un factor importante, ya que la deficiencia se traduce en el raquitismo de los árboles.

En esta misma dirección (Pelissari, Guimaraes y otros, 2014) confirman que, la teca se desarrolla en gran variedad de suelos y formaciones geológicas, en suelos de textura franco arenosa y arcillosa, profundos con buen drenaje, terrenos planos o poco inclinados y fértiles. En cuanto al PH los mismos autores referencian a Kosa – ARD y Tanaka et al quienes en 1998 determinaron, la especie prefiere un suelo de ligeramente ácido a alcalino 6,5 a 7,5 en contraste con Ovima, quien en 2008 determina que el PH óptimo para producción de teca en India y Mianmar esta en el intervalo 6 a 8 y Mollinedo 2003 y González 2010 concluyen, la teca no debe ser cultivada en suelos con PH inferiores a 5,5. En referencia con las demandas de calcio los autores en acuerdo con investigaciones de Vásquez y Ugalde, 1995 y Mollinedo, García 2003, indican que no solo debe presentarse por encima de los 10 cmol\* en los primeros horizontes, debido que las bases de magnesio inferiores a 5 cmol\* pueden limitar el crecimiento de la teca. Niveles de potasio y fosforo inferiores a 4.mg\* son críticos para el desarrollo de la teca. Se presenta poco crecimiento en concentraciones de aluminio superiores a 1,3 cmol\*. La materia orgánica en el cultivo de teca juega un papel importante en el suministro de nutrientes y regulación del PH en el suelo.

## Clima

Desde el punto de vista de la interacción clima y el establecimiento de plantaciones forestales (Ladrach, 2010) plantea, la precipitación mínima requerida 1.200 mm/año, también como factor de importancia la duración, cuando hay sequía de tres meses, el efecto sobre el crecimiento y la salud de los árboles se convierte en determinante productivo de los bosques plantados, con precipitaciones mayores a 2.500mm, se presentarían inconvenientes por el exceso de humedad en el suelo, mayores riesgos de problemas fitosanitarios y problemas logísticos.

(Pelissari, Guimaraes y otros, 2014) expresan, la teca presenta mayor tasa de crecimiento en localidades con precipitación anual de 1250m.m. a 3.750m.m, asociado con un período de tres a cinco meses secos, temperaturas mínimas de 13°C a 17°C y máximo 39°C a 43° C, especie exigente en luz y sensible a las Heladas. En América Central el mayor crecimiento se observó en altitudes inferiores a los 500m, con estación seca de 4 a seis meses y temperatura media entre 23°C y 27°C. En Brasil la especie es cultivada en localidades con precipitación media anual entre 1.500mm a 2.750mm, temperaturas máximas de 35°C a 40°C y mínimas de 15°C a 20°C, y tres a cuatro meses secos.

## Topografía

Sitios con pendientes menores al 25%, al pie de monte o en el fondo de los valles, son considerados como los mejores para el cultivo de teca, se advierte no establecer en suelos con pendiente mayor al 30% (Fonseca W, 2004), para plantar en estos sitios, se recomienda utilizar la técnica de curvas a nivel, establecimiento de terrazas y cultivo de leguminosas como Kudzu, para evitar el escurrimiento superficial del agua (Cáceres Florestal, 2002).

## Modelación índice de sitio

Un modelo es una abstracción, o una representación simplificada de algún aspecto de la realidad, es frecuente la modelación inconsciente, se utiliza al hacer relaciones mentales de causa efecto. Los modelos pueden ser expresados en forma verbal

(describiendo la realidad) o material como un modelo a escala. Los modelos matemáticos son más concisos y menos ambiguos. Actualmente los equipos son una herramienta indispensable para el modelado (Vanclay, 1994).

Modelo de crecimiento generalmente se refiere a un sistema de ecuaciones que pueden predecir el incremento en altura y rendimiento de un bosque bajo una amplia variedad de condiciones. “Las curvas de índice de sitio son representaciones idealizadas del crecimiento de la altura de los árboles dominantes de un rodal durante su vida (Tschinkel, 1972<sup>a</sup>)”, (Sáenz, 2012), las ecuaciones IS, parten de la hipótesis que la rata relativa de crecimiento varía inversamente a la edad ( $\infty$ ) (Vanclay, 1994). Las ecuaciones con mayor uso son las de Schumacher y Richard – chapman (Nunifu, 1997).

La estimación del crecimiento y productividad del bosque, es un elemento clave en su gestión, permiten determinar el desarrollo anual de la plantación y el período de rotación de las cortas, además contribuyen a la selección adecuada de las especies a plantar en una determinada localidad. La modelación de altura dominante, se ha demostrado como el método más adecuado por su baja dependencia de la densidad.

En la tabla 3 se observan ejemplos de IS, resultado de procesos de modelación del crecimiento de la teca a nivel mundial. Los datos estimados con diversas edades de referencia y para diferentes proyecciones en el tiempo, no permiten realizar comparaciones inferenciales, sin embargo, se evidencian lugares de mayor y menor productividad.

**Tabla 3.** IS en el ámbito mundial

Autores	País	Rangos m.	
		Inferior	Superior
Miller 1969,	Trinidad y Tobago	15	23
Laurie and Ram 1981	Myanmar*	12	38
Keog 1982	Caribe, Centro América, Venezuela, Colombia	12	28
Friday 1987	Puerto Rico *	24	30
Melende y Temu 1990		16	25
Akindele1991	Noreste Nigeria	10	29
Drechsel and Zeck 1994.		12	28
Upadhyay etal 2005	India	11	29
Torres, Del Valle y Restrepo 2011	Colombia	9	25

**\*50 años de edad**

La modelación de la calidad de sitio en el ámbito mundial es similar al desarrollo investigativo en Colombia, un primer acercamiento al tema surge con las tablas provisionales para el rendimiento de teca en Trinidad y Tobago, (Miller, 1969); modelos provisionales para el rendimiento de teca en el norte de Gana (Nunifu y Murchinson, 1999); clasificación provisional del índice de sitio para El Caribe, Centro América, Venezuela y Colombia (Keogh 1982); curvas de índice de sitio y crecimiento en Volumen para teca en Tanzania (Malende, 1990); modelos de rendimiento y crecimiento de teca en plantaciones de Costa Rica (Bermejo 2004); comparación del crecimiento en altura de teca en Costa Rica con otros trabajos previos y con otras regiones del mundo (Mora y meza 2004); crecimiento y productividad de teca en plantaciones forestales jóvenes en Guatemala (Vaides, Ugalde y Galloway, 2004); (Pérez y Kanninen, 2005) escenarios de crecimiento para teca en Costa Rica. Como lo expresa (SPGS, 2013) en síntesis el mejor IS promedio para el crecimiento de la teca a nivel mundial se sitúa en 24 metros de altura para árboles dominantes.

La (Fig. 2) (Nunifu 1997) presenta el modelo de IS, resultado de su investigación para el norte de Ghana en comparación con los modelos de Trinidad e India a una edad de referencia de 20 años. El sitio más productivo en el área de estudio arrojó un índice de sitio 16 a 20m, con una edad de referencia 20 años comparables en productividad con sitios clasificados como IS ( V ) en la mejor zona forestal del país (16.60 a 24,9m), sin embargo se concluye que la teca tiene un buen potencial en esta área de estudio.

Figura 2 Comparación IS Trinidad, India y N. Gana

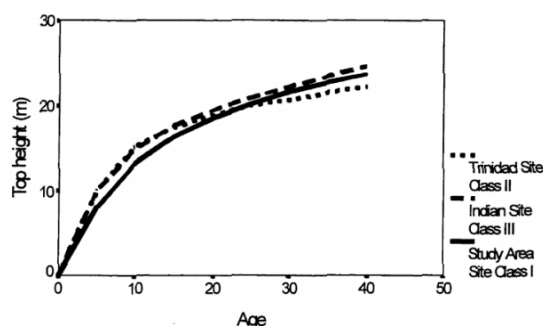
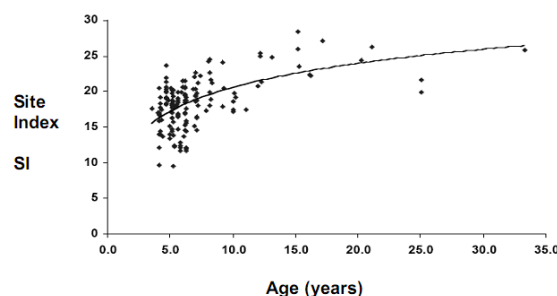


Figure 4. The graph of top height against age for site class I in the study area, Indian yield tables site class III, and site class II for Trinidad.

En Panamá (León y Martín, 2014) reportan el índice de sitio estimado por Gómez y Ugalde para plantaciones entre 4 y 34 años de edad, nivel superior 25 m y nivel inferior de 10 m, (Fig.3), cualificados respectivamente como excelente y bajo. El índice de sitio promedio se estimó en 24m (excelente).

Figura 3. IS Panamá



El índice de sitio para Costa Rica es modelado por (Montero, 1999) utilizando la ecuación modelo de Schumacher, los parámetros desarrollados por Vallejo y Ugalde a la edad base de 10 años. Concluye que las plantaciones en este país se ubican en las clases media a excelente con un IS mayor de 19,4m. Adicionalmente determina la correlación del IS con las variables climáticas, topografía y características fisicoquímicas del suelo, concluyendo:

Los suelos tienen una fertilidad alta, excepto por los contenidos de Potasio (K) y Fósforo (P ). El estado nutricional foliar se encuentra en un nivel medio.

El crecimiento de la teca en los sitios evaluados no esta condicionado a altos suplementos con calcio, se pueden alcanzar crecimientos hasta 30m. con rangos entre 4 a 23cmol+/l.

La especie posiblemente es eficiente en la remoción de Fósforo, crece bien con bajos contenido en el suelo. La especie tiene buen indicador de crecimiento IS con la eficiente utilización de los nutrientes disponibles en el suelo.

La precipitación media presentó 50% de correlación con el IS, en concordancia con Vásquez - Ugalde y

Vallejo, concluye que, la especie crece bien a partir de un límite inferior mínimo de 1500 mm.

Se obtuvo correlación de 43%, entre topografía e IS, no se recomienda plantar en pendientes > al 40 %.

La ecuación desarrollada con base en las variables con mayor correlación (déficit hídrico, posición topográfica y temperatura media) no fue muy alta, se recomienda ampliar la base de datos con una mayor diversidad de sitios. Estudios anteriores realizados por Vásquez, Ugalde y Vallejo, de igual forma obtuvieron correlaciones muy bajas entre estas variables y la calidad de sitio.

Los primeras investigaciones sobre calidad de sitio para la teca en Colombia, con base en la relación edad y altura de dominantes, iniciaron con el estudio alternativo de zonas aptas para teca (Rodríguez, 1968), el establecimiento de las bases para la formulación de proyectos de reforestación con teca (Echeverry, 1968) y la modelación con base en parcelas temporales (Henao, 1982), el tema surge nuevamente en el transcurso de las primeras dos décadas del presente siglo, con investigaciones basadas en datos procedentes de parcelas permanentes que permiten conocer mejor la calidad de sitio para la producción de teca en este país (Torres, del Valle y Restrepo, 2011) y (Restrepo, Del Valle, Orrego y Salazar, 2012), determinan el rendimiento, turno óptimo forestal y rentabilidad de plantaciones de teca en Colombia. El avance en estas investigaciones ha contribuido a identificar que las ecuaciones de Von Bertalanffy y Korf son estadísticamente aceptables para realizar la modelación de calidad de sitio en Colombia, con base en altura de árboles dominantes y la edad, sin embargo se destaca la ecuación de Korf como el modelo más apropiado.

La investigación "Site index for teak in Colombia" (Torres, del Valle y Restrepo, 2012) en el proceso de análisis del estado del arte concluye que los modelos de ecuaciones que arrojan curvas polimórficas son los más eficientes para la modelación del IS, se infiere que el crecimiento en altura es independiente de la densidad y finalmente

el experimento de Chaves et al 2003 determina, que los tratamientos de raleo no afectan la altura de los árboles dominantes. Estos hallazgos confirman la validez de modelar la calidad de sitio y el IS para predecir el futuro crecimiento de las plantaciones y tomar decisiones en el proceso de planeación, manejo y seguimiento.

Las investigaciones con referencia al IS en plantaciones juveniles son recientes y escasas. (Vaidés, Ugalde y Galloway, 2004) estudio realizado en plantaciones jóvenes entre 2,6 y 7 años en Guatemala, a edad base de 10 años, concluye que un 52% de las parcelas muestreadas, se ubicaron en sitios con crecimientos bajos (< a 16m), 27,78% rango medio (16m – 20m) en el 27,78%, rango alto (20 – 24m) 11,11% y excelente (> de 24m.) el 9,25%. El IS Promedio para Centro América, se estima en 18m. En contraste, referencia IS reportados por Mollinedo en Panamá (Bajo 13,43, medio 15,38 y alto 17,14).

La investigación más reciente (Tamarit, De los Santos y otros, 2014) Ecuaciones Dinámicas de índice de sitio para teca en Campeche México, se realizó en plantaciones entre 12 y 96 meses (1 a 8años), con base en mediciones sucesivas de parcelas permanentes desarrollaron, un modelo de crecimiento en altura dominante invariante a la edad de referencia. Usaron los modelos de Korf, Chapman – Richard y Hossfeld IV reformuladas como ecuaciones en diferencia algebraica Generalizada (DAG). La metodología tiene como característica especial el uso del enfoque Modelos de efecto mixto (MEN) que permiten la determinación de los parámetros en forma invariante a la edad de referencia. La ecuación derivada del modelo de Richard y Chapman generó las curvas con polimorfismo estadísticamente validas para plantaciones de teca en el área de estudio. La máxima altura dominante en el más alto índice de sitio se estimó en 23m.

### **Área de estudio**

Plantaciones localizadas en las veredas Tigre Medio zona de lomerío de las estivaciones del Darién,



terrazza aluvial del río Cuqué y lomeríos del río Unguía Medio, localidades del municipio de Unguía Chocó, al Norte de Colombia, Urabá Chocoano.

### **Planteamiento del problema**

El manejo inadecuado de las plantaciones sin un debido proceso de seguimiento, evaluación y control, es el factor fundamental que incide en la baja calidad de la madera de teca. Las plantaciones se aprovechan con base en la oferta y demanda del mercado sin tener en cuenta las condiciones medioambientales, el crecimiento y los turnos óptimos de corte.

Actualmente no existe competencia de oferta de buena madera de teca en el mercado mundial, las existencias de los bosques naturales son reservadas o están en vía de extinción u extintas, incrementándose la demanda de producción en bosques plantados y el incremento de precio. El turno de 25 a 30 años para la corta final de la madera hace difícil suplir la demanda mundial a corto plazo.

La demanda mundial de madera de teca y el déficit en la oferta propician la disminución de la edad de aprovechamiento en detrimento de la calidad, Pérez y Kanninen (2003). El aprovechamiento de las plantaciones a mediana edad (15 años) muestra la necesidad de mejorar los conocimientos y las técnicas de manejo para esta especie de rápido crecimiento debido principalmente a la baja productividad y baja calidad de los productos. La similitud de propiedades mecánicas de la madera de teca joven (21 años) y adulta (65 años) ofrecen un panorama alentador para la reducción del turno de rotación, sin afectar las características atractivas de la madera.

El incremento de la oferta de madera de teca con buena calidad demanda prestar atención a las particularidades que se describen a continuación.

Normalmente los suelos aptos para la agricultura se encuentran en producción y no son accesibles para el establecimiento de plantaciones forestales, debido al alto costo de las tierras o en algunos países por

reglamentación gubernamental, que no permite el uso de suelos agrícolas para la reforestación comercial. El cultivo de bosques en tierras marginales demanda la aplicación de procesos biotecnológicos y los mejores conocimientos en las técnicas de manejo silvicultural, así, como del monitoreo continuo del crecimiento y rendimiento. Ejemplo, Costa Rica ha logrado mejorar la producción de teca en zonas marginales con base en investigación continua y desarrollo tecnológico.

En relación con el tema (Combatt y Orozco, 2004) expresan que en Colombia las plantaciones se han establecido especialmente en el Caribe húmedo e identificaron que en el departamento de Córdoba municipios de Tierralta, Valencia y Montelivano las zonas establecidas como agroforestales presentan suelos con limitaciones desde el punto de vista químico, y plantean que por esta razón se requiere conocer las características fisicoquímicas que influyen sobre el rendimiento de las plantaciones incluyendo los cultivos de teca entre otras especies de común uso para la reforestación. El estudio de los autores concluye que: la zona presenta condiciones de reacción del suelo muy ácida, los materiales parentales hacen un bajo aporte de calcio, magnesio y potasio, la materia orgánica presenta deficientes aportes de nitrógeno y fósforo y por último determinan que para la producción forestal en estas tierras se requiere de planes de abonamiento.

Desde otro punto de vista, la falta de información sobre crecimiento y rendimiento de las plantaciones limitan la posibilidad de estimar la productividad y se puede actuar con referentes sobreestimados.

La escasa investigación sobre el crecimiento en la etapa juvenil de la teca, edad clave para el desarrollo óptimo de la plantación, evidencia un vacío en el conocimiento. En Colombia el establecimiento de parcelas permanentes para el monitoreo del desarrollo de las plantaciones no es una práctica común y se puede considerar inexistente en las plantaciones de pequeños productores. Son escasos los proyectos que

establecen parcelas permanentes para evaluar el desempeño de las plantaciones en un período menor a cuatro años de edad, justificado en que el desarrollo de los árboles en este lapso de tiempo, tiene una alta dependencia del manejo silvicultural, esta situación conlleva el desconocimiento sobre efectividad de los tratamientos aplicados y en especies de rápido crecimiento, en la etapa juvenil la plantación puede entrar rápidamente a expresarse en relación con la calidad de sitio, especialmente cuando se aplican procedimientos técnicos estándar o paquetes tecnológicos generalizados. A edades jóvenes, es factible introducir correctivos de manejo económicamente viables. La modelación a posteriori se limita a expresar el crecimiento y rendimiento esperado con base en los manejos del bosque realizados y es de utilidad para el establecimiento de nuevas plantaciones en la misma área y no para el monitoreo del cultivo en desarrollo.

### Preguntas de investigación

¿La identificación cualitativa de la buena calidad de sitio para el cultivo de teca, es acorde con los resultados de la modelación del IS?

¿Las clases de sitio para el área de estudio se ubicaran dentro de los rangos hallados por Torres, Del Valle y Restrepo?

Existe relación entre las variables evaluadas cualitativamente y las clases de sitio resultado del proceso de modelación?

### Métodos

Previo el establecimiento de la plantación, se realizó la selección de especie, con base en proceso de modelación de la calidad de sitio o estación con la aplicación del método indirecto.

Se establecieron 31 parcelas permanentes al azar, y se registraron las alturas y diámetros durante cuatro años (etapa juvenil de la teca), adicionalmente se realizaron muestreos en plantaciones de 6,98 y 9,44 años de edad para estimar el índice de sitio a una edad de referencia de 12 años.

### Unidad de análisis

Área plantada con teca: 30.8 ha

Densidad de siembra: 1.286 árboles/ha

Relieve: Sistema colinado

En el año 2011 se diseñó y aplicó el método de muestreo en campo como se describe a continuación:

### Selección de la muestra

La modelación de la calidad de sitio y el índice de sitio se realizó con base en información recabada

De acuerdo con las características de la población se consideró pertinente la realización de un muestreo aleatorio al azar y estratificado según calidad de sitio, el tamaño de la muestra se estimó aplicando el siguiente estadígrafo (Moráquez, 2007).

Total de árboles plantados: 39.603

Área real de siembra: 30.8 ha.

Error estimado 3%

Selección de la muestra:  $n = 1 / (1/n_0 + 1/N)$

$$n_0 = (z^2 * \sigma^2) / d^2$$

$$z = 1,96$$

N= Total árboles sembrados

$\sigma^2$  = Varianza cantidades a estimar

$$\sigma = 0,5$$

d= 0,03 error estimado

$$n_0 = (1,96^2 * 0,5^2) / 0,03^2 = 1067$$

$$n_0 = 1039$$

Intensidad de muestreo = 2%. Esta es la muestra mínima para un error estimado del 3%

### Tamaño y forma de las parcelas

Se considera que la forma circular de las parcelas de muestreo presenta una mayor eficiencia en costo y tiempo de establecimiento con un efecto de borde menor, comparadas con otro tipo de parcelas (Murillo y Camacho, 1997), por lo cual, se establecen parcelas circulares de 9,78m de radio

para un área de 300m<sup>2</sup>, en promedio se obtuvo una muestra de 38 árboles por parcela.

## Materiales

Cinta métrica de 20m  
Cinta métrica 1m  
Pintura a base de aceite en aerosol o tarro  
Brocha  
Clinómetro  
GPS Garmin  
2 estacas o jalones  
Mapa de la finca 1:5000  
Calculadora  
Cámara fotográfica  
Recolección de información

La información primaria para el análisis de la calidad de sitio, se obtuvo con base en cuatro mediciones anuales de la altura total y circunferencia a una altura de 1.30 cm en el tallo del árbol. Para la modelación del crecimiento y la calidad de sitio la base de datos se complementó con mediciones en plantaciones con características de sitio similares a las del área plantada (Bedoya, 2011 a 2014).

## Factores edáficos

El componente físico químico del suelo, es evaluado con base en análisis de muestras de suelo, procesadas en el laboratorio de la Escuela de Geociencias de la Universidad Nacional de Medellín. Se realizó un análisis de suelos previo al establecimiento de la plantación, y después de instaurada, se realizaron tres análisis asociados a la tipificación del terreno con base en las clases de pendiente, posición topográfica y calidad de sitio. Las muestras de suelo se tomaron por medio de calicatas con una profundidad de 0.50m y una superficie de 0.50 m por lado. La interpretación de los resultados de laboratorio se realizó con base en el método propuesto por (Ramírez, 2011) y con apoyo en (Jaramillo, 2011) y en referencia específica a la teca (Alvarado y Raigoza, 2007).

La clasificación del sitio por pendiente del terreno se realizó con referencia a la siguiente escala:

Clase I: 0 – 15%  
Clase II: 15% - 30%  
Clase III: 25% - 40%  
Clase IV: 0 – 15% en colina

El relieve donde se localiza cada parcela se clasifica como cóncavo o convexo.

## Clima:

Se describe con base en datos secundarios publicados por el IGAC y el IDEAM

El análisis de la información, se realizó con base en la estadística descriptiva, la presentación de datos gráficos y porcentajes numéricos como frecuencia, promedios, porcentajes, entre otros y la estadística inferencial se empleó para calcular estadígrafos de media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, error estándar, error de muestreo y conocer la distribución y variación de la población, adicionalmente se utilizó en la elaboración de modelos que permiten establecer el tipo de relaciones existentes entre las variables que componen los fenómenos analizados.

## Calidad de sitio

La calidad de sitio antes de sembrar los árboles se evaluó a través de los métodos descriptivos y de comparación entre las condiciones ambientales ideales para el cultivo de teca y las características que presenta el lugar de evaluación con base en factores edáficos, topográficos y climáticos. La variación del clima se presenta en función del tiempo y no del espacio por carencia de información climática histórica.

La modelación de la calidad de sitio después de sembrada la plantación, se realizó con base en el método directo con datos de diámetro y altura registrados en las 31 parcelas durante tres años de medición sucesiva y un submuestreo de 10 parcelas a los cuatro años, como medida de verificación.

Clasificación de sitio: Sitio I, Sitio II, Sitio III y sitio IV, siendo el mejor el I y el de menor calidad el IV.

De acuerdo con el objetivo de investigación se identificaron las siguientes variables Tabla 4.

Tabla 4. Variables objeto de investigación

Parámetro	Variables
<b>Edáfico</b>	Características físicas (Textura) Características químicas (PH, Calcio)
<b>Climático</b>	Temperatura, precipitación, distribución
<b>Topográfico</b>	Pendiente Altura sobre el nivel del mar (asnm)
<b>Calidad de sitio</b>	Altura, diámetro, edad

## Ecuaciones de referencia y modelación de datos

La modelación de la calidad de sitio con base en árboles dominantes se efectuó a través de las ecuaciones de IS Korf (1), Schumacher (2) y Richard- Chapman (3) que es una variación de la propuesta por Von Betalanffy, selección basada en las investigaciones realizadas para Colombia, que han identificado las ecuaciones (1) y (3) como estadísticamente aceptables y la (2) que ha sido comúnmente utilizada en la forma propuesta por Gonzales en 1994 (Sáenz, 2012).

El ajuste de las curvas a los datos se determinó con la aplicación de procesos estadísticos de regresión simple y no lineal. La evaluación de los modelos se llevó a cabo a través del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la correlación de errores se evaluó a partir del coeficiente de Durbin – Watson. También, los residuales se analizaron a partir del error medio de la estimación, el error estándar de la estimación, el error absoluto y el error medio porcentual con el fin de revisar aberraciones en la base de datos. Finalmente con la prueba estadística para comparación de datos pareados se determinó la diferencia entre los datos estimados con cada modelo, adicionalmente se realizó el análisis de ANOVA y prueba de múltiples rangos.

$$Hd = \text{Exp}(a-b/T^c) \quad \text{Korf (1)}$$

$$Hd = a \cdot \text{Exp}(-b/T) \quad \text{Schumacher (2)}$$

$$Hd = a \cdot (1 - \text{Exp}(-b \cdot \text{Edad}_{\text{años}}))^c \quad \text{Richard y Chapman (3)}$$

Hd = Altura árboles dominantes

a,b,c = constantes

T= edad

## Resultados

### Método Indirecto por factores (Edáficos, topográficos y climáticos)

Se realizó una comparación entre las características ambientales requeridas para el desarrollo óptimo de la teca y las encontradas para el predio. Tabla 5.

Tabla 5. Comparación variables ambientales

Características biofísicas óptimas para teca	Condiciones biofísicas del terreno de siembra
Altitud: 0 – 1.000 msnm	Altitud: 100 – 200 msnm
Temperatura promedio anual: 22 – 27 °C	26.5°C
Precipitación: 700 – 3.000 mm. Desarrollo óptimo: 1.000 a 2.000mm 3 – 4 meses secos	Precipitación promedio anual: 1999 m.m., tres meses secos entre diciembre y el 3 de marzo y un veranillo entre el mes de agosto y septiembre.
Suelos: profundos, francos, desarrollados y aireados, ideal aluviales, puede adaptarse a suelos pobres y suelos calcáreos con PH de 5 – 8, preferiblemente PH de 6.5 – 7, no tolera el agua estancada y la arcilla anaeróbica.	Suelos: Franco arcilloso (Far), moderadamente profundo y bien drenado, con bastante oxígeno y buena aireación, buena fertilidad natural a excepción del potasio y fósforo. PH: 5.9, no presencia de agua estancada y arcillas anaeróbicas.
Pendiente: no mayor del 25%, algunos incluyen plantar en pendientes menores de 40%	Pendiente: variada plana, suave y algunas áreas entre 25 y 40%
Contenidos nutricionales limitantes: Los suelos no deben tener menos de 8 meq-ml* de calcio o muy ácidos con alto contenido de hierro	Suelos con más de 8 meq-ml de Calcio, ligeramente ácidos, con poco contenido de hierro.

\*Meq-ml: Mili equivalentes por mililitro.

## Análisis detallado del cuadro comparativo

### Clima

Reporte promedios anuales del clima en otras latitudes donde se produce la teca posibilitan la siguiente comparación, Tabla 7.

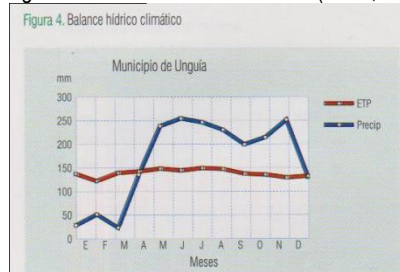
Tabla 6. Climas del mundo y producción de teca

Lugar	Precipitación	Temperatura
Nazara al sur de Sudan	1300-1600 m	28 – 35 °C
Myanmar (originaria)	1250 - 3750 mm	15 – 41 °C
Indonesia	1511– 2108 mm	30 – 31 °C
Ungüa	1999 -2000 mm	26.2 °C
Colombia		

El balance hídrico climático (Fig. 4), (IGAC, 2006), presenta para el municipio de Ungüa, un periodo seco, meses de diciembre a marzo y veranillo entre agosto a octubre, sin embargo en este segundo evento de sequía la disminución de las lluvias no

alcanza niveles que induzcan una segunda defoliación de los árboles, considerada de incidencia negativa para el crecimiento de la plantación.

Figura 4. Balance hídrico climático (IGAC, 2006)



## Fertilidad del Suelo

En el cuadro comparativo Tabla 6, se observan restricciones de fertilidad del suelo que limitan el desarrollo del cultivo, lo cual induce al análisis detallado con base en el resultado fisicoquímico de las muestras de suelos.

Textura: tabla 8, texturas por clase de sitio:

Tabla 8. Texturas promedio y por sitio

Textura	Composición		
	A%	L%	Ar%
Far (Promedio)	34	32	34
Ar (Parcela 05)	26	28	46
Far (Parcela 12)	32	34	34
FA (Parcela 19)	66	24	10
FAR-FA(Parcela 25)	56	24	20

El perfil y horizontes del suelo evaluado son dominados por componentes asociados a los Inceptisoles y alfisoles. Las restricciones para el cultivo de teca se han identificado en suelos caracterizados como vertisoles, que presentan condiciones prolongadas de encharcamiento y resquebrajamiento y los entisoles poco profundos o arenosos en los cuales se ve afectado el crecimiento radical y se presentan con frecuencia deficiencias de N, P y Mn. (Drechsel, Schmall y Zech 1989).

PH: ligeramente ácido puede presentar problemas de baja solubilidad del P y regular disponibilidad de Ca y Mg. El PH se encuentra en el rango de 5 – 8, determinado como apto para el cultivo de teca. En suelos con PH menor a 4,3, la teca presenta crecimiento limitado, se recomienda la siembra en suelos con PH > a 4.3 (Alvarado, 2006).

Los resultados referidos Tabla 7. Presentan una fertilidad natural buena, deficiencia en elementos mayores potasio (K), fósforo (P) y en elementos menores azufre (S), Zinc (Zn) y Boro (B). En contraste con el estudio (Montero, 1999) en plantaciones de teca en Costa Rica Tabla 8, se observa similitud con las características nutricionales de estos suelos, caracterizados con fertilidad alta y posibles déficit de Potasio y fósforo. Deficiencias nutricionales que se pueden corregir con la fertilización adecuada.

Tabla 7 Resultados y análisis muestreo de suelos

Variables	Promedio	P(05)	P(12)	P(19)	P(25)	Estimativos
Textura	Far	Ar	Far	FA	FAR-FA	
PH	5,9	5,9	6,3	6,3	6,4	Acido moderado y ligero
M.O.	3,3	1	2,1	1,5	1,4	Bajo (P25,19,05) - medio
Al	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	No disponible x PH>5,5
Ca	12,4	8,7	12,1	12,8	10,1	Alto
Mg	10,6	5,6	11,9	3,5	22	Óptimo - Alto
K	0,03	0,02	0,02	0,2	0,02	Bajo
CICE	23	14,3	24,2	16,3	32,1	Adecuada u optima
P	2	4	4	5	4	Bajo
S	4	1	1	2	1	Bajo
Fe	18	23	31	21	6	Medio - óptimo
Mn	21	6	6	6	4	Medio - óptimo(Bajo P25)
Cu	4	3	3	2	1	óptimo
Zn	1	1	2	1	1	Bajo
B	0,19	ND	0,14	ND	ND	Bajo
N	0,165	0,05	0,11	0,08	0,07	Bajo (Alta Mineralización)
C	1,9	0,6	1,2	0,9	0,8	Bajo
C/N	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	Media
Mg/K	353	280	595	18	1100	K y Mg (Deficit K)
Ca/K	413,3	435	605	64	505	K (Deficit)
(Ca+Mg)/K	766,7	715	1200	81,5	1605	K (Deficit)
(Ca/Mg)	1,17	1,55	1,02	3,66	0,46	Parcela 19 (Ideal)

Tabla 8. Resultados análisis suelos Costa rica, (Montero, 1999).

Cuadro 18. Análisis de suelos de plantaciones de teca en sitios malos y buenos en el trópico seco de Costa Rica.

No de muestra	pH	Ca	Mg	K	Acidez	CICE	P	Cu	Fe	Mn	Zn	S	
		cmol (+) L <sup>-1</sup>					mg L <sup>-1</sup>						
		SITIOS MALOS											
1	6,07	38,20	7,00	0,06	0,18	45,44	6	12	25	37	3	7	
2	5,86	30,80	11,40	0,04	0,17	42,41	1	12	10	7	1	1	
3	5,84	36,20	9,80	0,09	0,23	46,32	5	12	35	45	2	4	
4	5,68	31,00	10,70	0,03	0,17	41,90	1	6	21	7	1	2	
5	5,65	24,10	7,60	0,16	0,23	32,09	8	21	44	53	3	6	
6	5,64	15,50	5,10	0,14	0,16	20,90	2	23	70	20	2	2	
7	5,73	25,80	7,60	0,03	0,15	33,58	2	9	22	12	1	4	
8	5,76	29,30	6,20	0,13	0,22	35,85	5	17	38	53	3	8	
9	5,70	22,90	7,90	0,12	0,32	31,24	5	13	40	63	2	7	
10	5,82	31,90	11,20	0,03	0,17	43,30	1	6	11	5	1	1	
SITIOS BUENOS													
11	5,90	47,10	9,00	0,05	0,15	56,30	3	11	28	6	2	3	
12	6,30	24,30	3,50	0,23	0,18	28,21	4	11	13	8	2	1	
13	6,37	38,00	7,80	0,19	0,19	46,18	7	6	26	23	1	6	
14	6,03	30,40	2,97	0,44	0,19	34,00	16	11	50	30	4	6	

## Análisis topográfico

Acorde con la investigación (Vaides, Ugalde y Galloway, 2004), la fisiografía del lugar presenta variables que están en ajuste con los requerimientos del cultivo de teca. La elevación sobre el nivel del mar varía entre 100 y 200m. < 220m.s.n.m. recomendado por el estudio, la pedregosidad < 60% y el relieve ondulado a plano se identifican como aptos. Sin embargo en este proceso de investigación se estima de importancia evaluar los parámetros, pendiente por parcela, posición fisiográfica y el relieve desde el punto de vista cóncavo o convexo. En la Tabla 9 se presentan los valores de cada variable asociada a las parcelas del muestreo.

Tabla 9. Variables fisiográficas por parcela

Variable	Posición	Pendiente %	Relieve	Parcelas
CATEGORIA	Ladera	0-15	Convexo	20,25
	Ladera	15-30	Convexo	1,5,8,9,13,15,17,21,29
	Ladera	25-40	convexo	7,10,27,28
	Ladera	0-15	Cóncavo	4,16,22,31
	Ladera	15-30	Cóncavo	11,12,14,18,24,30
	Cima	0-15	convexo	2
	Cima	15-30	convexo	3
	Cima	0-15	Plana	26
	Planicie	0-15	Cóncavo	6
	Planicie	0-15	Plana	19,23

## Índice de sitio por crecimiento en altura

El análisis de crecimiento de una plantación a través del índice de sitio permite, modelar el crecimiento en función de la relación altura – edad. Este procedimiento que contribuye a darle valor agregado a los inventarios, permite identificar la respuesta del crecimiento de los árboles en relación con diferentes variables del sitio y con base en ello se pueden planificar y ejecutar programas de fertilización, manejo de plagas y enfermedades, y el monitoreo continuo del crecimiento del bosque.

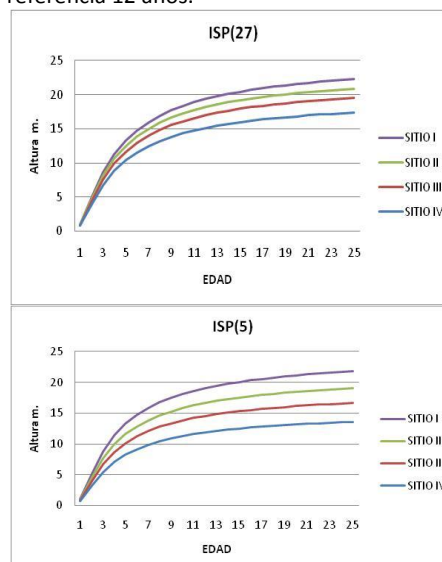
La sistematización, procesamiento y análisis de los datos concluye con la selección de la ecuación de IS con mejor ajuste, El procedimiento se realizó

aplicando al grupo de datos de altura de dominante de cada parcela, el proceso estadístico de regresión simple, y estableciendo la correlación entre la variable dependiente altura de dominantes  $H(d)$  y la variable independiente edad. Con base en los coeficientes encontrados (regresión lineal y no lineal) se construyeron las familias de curvas IS ajustadas para cada parcela Anexo 1, y las curvas ajustadas promedio. Los cálculos se realizaron a través del programa estadístico, STATGRAPHICS Centurión.

Como referencia comparativa dentro del proceso de modelación por parcelas las (Fig 5, 6,7) presentan las familias de curvas de IS en los límites bajo y alto resultado del proceso estadístico de ajuste de las tres ecuaciones de referencia.

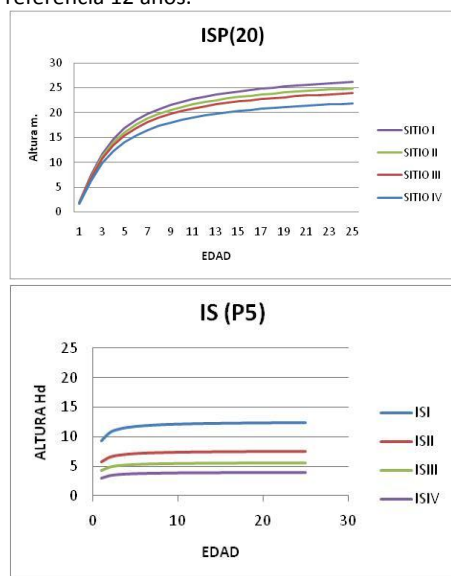
Se observa que el modelo ajustado con base en la ecuación Shumacher, sobreestima los valores en comparación con los datos originales. Las ecuaciones de Korf y Richard Shapman presentan una mejor correlación con los datos reales, sin embargo de acuerdo con el comportamiento de los errores asintóticos se observó un mejor ajuste con la ecuación Richard - Chapman

Figura 5. Índice de sitio alto y bajo Schumacher, edad de referencia 12 años.



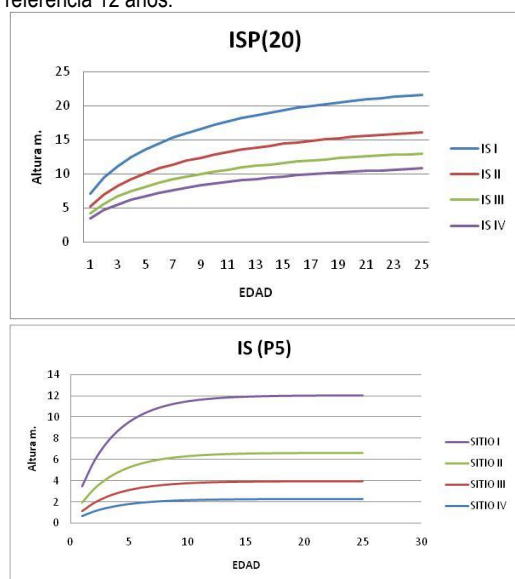
El análisis por regresión simple, arrojó  $R^2$  para la parcela 27 de 97,0274 % y la 5 de 83,0992 %

Figura 6. Índice de sitio alto y bajo Korf, edad de referencia 12 años.



El análisis por regresión no lineal, arrojó  $R^2$  para la parcela 20 de 97,6128% y la 5 de 98,6583%.

Figura 7. Índice de sitio alto y bajo Richard y Chapman, edad de referencia 12 años.



El análisis por regresión no lineal, arrojó  $R^2$  para la parcela 20 de 97,4547% y la 5 de 89,6594%.

### Análisis estadístico IS Promedio Schumacher

Regresión Simple - LOG (Hd) vs. 1/Edad\_años

Variable dependiente: LOG (Hd)

Variable independiente: 1/Edad\_años

Lineal:  $Y = a + b \cdot X$

Tabla 10. Resultados de la Estimación

Fuente	Suma de Cuadrad	Gl	Cuadrad o Medio	Razón- F	Valor -P
Modelo	9,3817	1	9,38174	211,45	0,00
Residuo	4,5699	103	0,04437		
Total	13,952	104			
(Corr.)					

Tabla 11. Análisis de varianza

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	Valor-P
Parámetro	Estimado	Error	T	
Intercepto	2,89772	0,060270	48,0788	0,0000
Pendiente	-2,14509	0,147516	-14,5414	0,0000

Coefficiente de Correlación = -0,820028

R-cuadrada = 67,2446 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 66,9266 porciento

Error estándar del est. = 0,210638

Error absoluto medio = 0,163848

Estadístico Durbin-Watson = 1,98864 (P=0,4770)

Auto correlación residuos en retraso 1 = 0,00130168

Ecuación:

$\text{LOG}(\text{Hd}) = 2,89772 - 2,14509 \cdot 1/\text{Edad\_años}$

El valor P de la tabal ANOVA menor que 0,05 indica una relación estadísticamente significativa entre la variable dependiente LOG(Hd) e independiente 1/edad\_años.

El modelo ajustado explica 67,2446% de variabilidad en altura de los árboles dominantes H(d), significando una relación moderadamente fuerte entre las variables (Fig. 8, 9).

Figura 8. Regresión lineal correlación datos y residuales

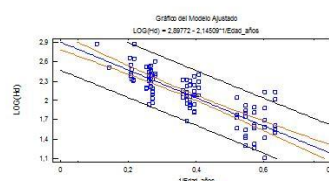
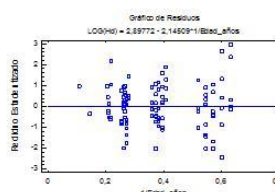


Figura 9 .Análisis de residuales





Se revisó la base de datos para corregir registros aberrantes.

La ecuación de IS Schumacher se ajustó de la siguiente forma:

$$IS=EXP (LN(Hd)-2,14509*((1/12)-(1/Edad\_años)))$$

La Tabla 12 destaca valores de IS a edad de referencia 12 años, y valores esperados para el año 25. Los mínimos valores se encuentran entre el rango 11,8m y 12,41m respectivamente y los mayores entre 19,94 y 21,88. La comparación de los valores de IS a los 12 años y 25 indican que el crecimiento después de 12 años incrementa levemente entre 0,6m. y 2 m. con crecimiento promedio anual 0,046 m a 0,15 m.

Tabla 12. IS promedios a edad de referencia 12 años y 25 años

IS promedio modelo Schumacher				
IS	SITIO IV	SITIO III	SITIO II	SITIO I
Edad referencia 12 años	11,8	14,22	16,19	19,9
Proyección Año 25 años	12,41	15,53	17,76	21,8

### Análisis estadístico IS Promedio Korf

Regresión No Lineal - LOG (Hd)

Variable dependiente: LOG(Hd)

Variables independientes: Edad\_años

Función a estimar:  $a+b*(1/Edad\_años)^c$

Estimaciones iniciales de parámetros:

$$a = 1,0$$

$$b = -1,0$$

$$c = 0,5$$

Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 17

Número de llamadas de la función: 85

Tabla 13. Resultados de la Estimación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	461,017	3	153,672
Residuo	4,52881	102	0,0444001
Total	465,546	105	
Total (Corr.)	13,9517	104	

Tabla 14. Análisis de varianza

Parámetro	Estimado	Error Estándar Asintótico	Intervalo Confianza 95,0%	
			Asintótico Inferior	Superior
a	3,30107	0,560966	2,1884	4,41375
b	-2,34397	0,376955	-3,09166	-1,59628
c	0,65573	0,374026	-0,0861509	1,39761

$$R\text{-Cuadrada} = 67,5393 \%$$

$$R\text{-Cuadrada (ajustada por g.l.)} = 66,9028 \%$$

$$\text{Error estándar del est.} = 0,210713$$

$$\text{Error medio absoluto} = 0,163742$$

$$\text{Estadístico Durbin-Watson} = 2,00157$$

$$\text{Autocorrelación residual de retardo 1} = -0,00213079$$

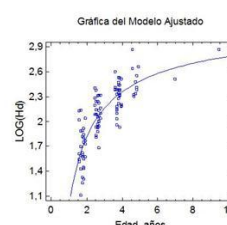
Tabla 15 Análisis de Residuos

Estimación	
n	105
CME	0,0444001
MAE	0,163742
MAPE	8,52455
ME	0,00551655
MPE	-1,00611

Ecuación

$$LOG (Hd) = 3,30107-2,34397*(1/Edad\_años)^{0,65573}$$

Figura 10. Modelo ajustado Korf



El modelo ajustado explica 67,5393 %de la variabilidad en LOG (Hd). Comparado este resultado con el R<sup>2</sup> Schumacher la ecuación de Korf presenta un mejor ajuste (Fig.10).

Ecuación para cálculo IS Korf:

$$IS=EXP ((LN (Hd)-2,34397*((1/(12^{0,65573})-(1/(Edad\_años^{0,65573}))))))$$

La tabla 17, destaca los valores del IS a la edad de referencia de 12 años y valores esperados al año 25. Los mínimos valores de IS se estimaron entre



12,57m y 13,79m. y los máximos entre 22,61 y 24,81. La comparación entre los valores a los 12 años y 25 años muestra que el crecimiento después de los 12 años tiene un incremento leve entre 1,23 m. y 2,2 m. indicando un crecimiento promedio anual de 0,09m a 0,17m.

Tabla 16. IS promedio Korf edad referencia 12 años y 25 años

IS promedio modelo Korf					
IS	SITIO IV	SITIO III	SITIO II	SITIO I	
<b>Edad referencia 12 años</b>	12,57	15,72	18,42	22,62	
<b>Proyección 25 años</b>	13,80	17,25	20,22	24,82	

### Análisis estadístico IS Promedio Richard y Chapman

#### Regresión No Lineal – Hd

Variable dependiente: Hd

Variables independientes: Edad\_años

Función a estimar:  $a*(1-Exp(-b*Edad\_años))^c$

Estimaciones iniciales de parámetros:

a = 12,9389

b = 0,607583

c = 1,83081

Método de estimación: Marquardt

La estimación se detuvo debido a la convergencia de la suma de cuadrados de residuos.

Número de iteraciones: 5

Número de llamadas de la función: 22

Tabla 17. Resultados de la Estimación

		Intervalo Confianza a			95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
a	18,6524	3,67355	11,3659	25,9389	
b	0,232311	0,114793	0,00461808	0,460003	
c	1,09242	0,259824	0,577055	1,60778	

Tabla 18. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	8142,02	3	2714,01
Residuo	284,627	102	2,79046
Total	8426,65	105	
Total (Corr.)	891,045	104	

R-Cuadrada = 68,057 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 67,4306 por ciento

Error estándar del est. = 1,67047

Error medio absoluto = 1,32023

Estadístico Durbin-Watson = 1,88536

Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0541457

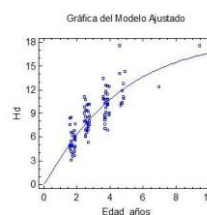
Tabla 19. Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	105	
CME	2,79046	
MAE	1,32023	
MAPE	17,2952	
ME	-0,00216498	
MPE	-4,55793	

La ecuación del modelo ajustado es:

$$Hd = 18,6524*(1-Exp(-0,232311*Edad\_años))^1,09242$$

Figura 11. Curva ajustada Richard y Chapman



El modelo ajustado explica 68,057 % de la variabilidad en LOG (Hd). Comparado este resultado con el R<sup>2</sup> Schumacher la ecuación de Korf presenta un mejor ajuste.

La tabla 20, destaca los valores del IS a la edad de referencia de 12 años y valores esperados al año 25. Los mínimos valores de IS se estimaron entre 13,26m y 14,17m respectivamente y los máximos entre 22,29 y 23,81. La comparación entre los valores a los 12 años y 25 años muestra que el crecimiento después de los 12 años tiene un incremento leve entre 0,91 m. y 1,52 m. indicando un crecimiento promedio anual de 0,07m a 0,11m.

Tabla 20. IS promedio Richard - Chapman edad referencia 12 años y 25 años.

IS promedio modelo Richard y Chapman					
IS	SITIO IV	SITIO III	SITIO II	SITIO I	
<b>Edad referencia 12 años</b>	13,26	15,90	18,23	22,28	
<b>Proyección 25 años</b>	14,17	16,99	19,48	23,81	

### Análisis estadístico comparativo, ecuaciones de ajuste a datos promedios.

Muestra 1: IS Korf

Muestra 2: IS Schumacher

Muestra 3: IS Richard \_ Chapman

Muestra 1: 105 valores en el rango de 10,3096 a 30,1581  
Muestra 2: 105 valores en el rango de 9,25212 a 27,339  
Muestra 3: 105 valores en el rango de 9,84319 a 28,4815

Tabla 21. ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	281,886	2	140,943	10,91	0,0000
Intra grupos	4029,26	312	12,9143		
Total (Corr.)	4311,15	314			

#### El StatAdvisor

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

Para determinar cuales medias son diferentemente significativas de otras, se realizó una prueba de múltiples rangos:

#### Pruebas de Múltiple Rangos

Tabla 22. Comparación de medias Método: 95,0 porcentajes LSD

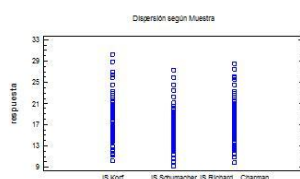
	Casos	Media	Grupos Homogéneos
IS Schumacher	105	15,5021	X
IS Richard _ Chapman	105	17,382	X
IS Korf	105	17,6153	X

\* indica una diferencia significativa

Contraste	Si g.	Diferencia	+/- Límites
IS Korf - IS Schumacher	*	2,11317	0,975872
IS Korf - IS Richard _ Chapman		0,233274	0,975872
IS Schumacher - IS Richard _ Chapman	*	-1,87989	0,975872

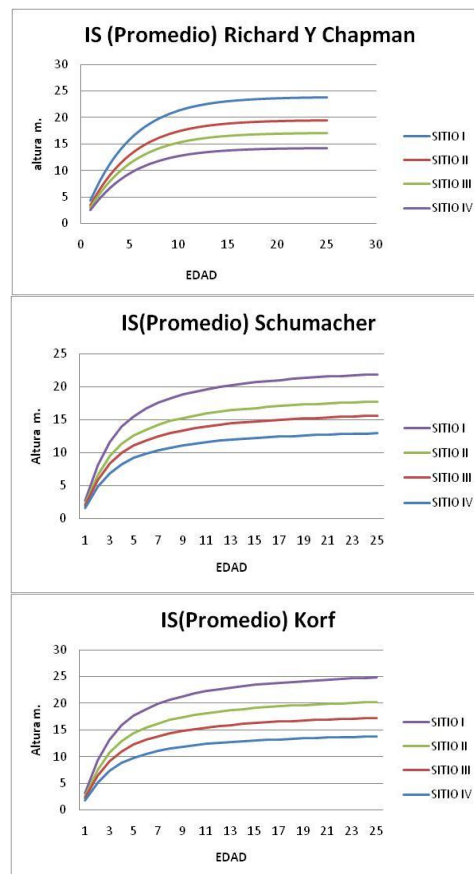
Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Figura 12. Gráfico comparación de medias



Se concluye, no existe diferencia significativa entre las ecuaciones Korf y Richard – Chapman (Fig. 13).

Figura 13. IS Promedio modelos área de estudio



Observando nuevamente los valores  $R^2$  por parcela con la ecuación de Korf varían entre 72,36% parcela 19 y 97,75% parcela 20 y la ecuación de Richard-Chapman entre 77,43% parcela 24 y 97,46% parcela 20, se ratifica que no hay diferencias significativas entre los dos modelos, se confirma que Korf es un buen modelo de curva ajustada, en concordancia con los hallazgos realizados por (Torres, del Valle y Restrepo, 2011) y (Restrepo, Del Valle, Orrego y Salazar, 2012), quienes identificaron la ecuación Korf con mejor ajuste para la evaluación de sitio en cultivos de teca, Colombia. Sin embargo en el análisis por parcela de la presente investigación, se observó que la ecuación de Richard y Chapman describe mejor el crecimiento observado en la mayoría de las parcelas y en otros casos el mejor ajuste se logra con el modelo Korf,

así como sugieren (Tamaris – urias et al, 2014), no es posible aplicar un modelo único para todos los sitios, siendo necesario generar curvas de índice de sitio específicas para cada uno.

### Contraste entre variables Calidad de sitio antes de plantar con IS plantación juvenil.

De acuerdo con los resultados de la modelación parcela por parcela se considera pertinente realizar las comparaciones entre análisis con base en los resultados de IS con base en los modelos Korf y Richard - Chapman.

En contraste con la calificación de sitio antes de plantar, el IS calculado para cada parcela presenta diferencias en las valoraciones de calidad de sitio en las parcelas 12 y 19 Tabla 23.

Tabla 23. Comparación entre calidad de sitio e IS.

Parcela	Calidad de sitio antes de plantar	IS- Edad 12 años Inferior - superior		Calidad etapa juvenil
<b>*5</b>	Mala	3,91	12,13	Malo
<b>**12</b>	Regular	9,29	17,27	Excelente
<b>*19</b>	Excelente	13,64	18,28	Excelente
<b>**25</b>	Buena	8,28	16,75	Buena
<b>Promedio</b>		<b>*12,56</b>	<b>22,61</b>	

Según R<sup>2</sup> y ajuste datos observados \*Korf - \*\*Richard -Chapman

El índice de sitio con mayor valor corresponde a la parcela 19 con textura franco arenosa y la parcela 12 Franco arcillosa. El IS con valor más bajo coincide con la parcela 05 textura arcillosa y pendiente > 45% concordando con los reportes de investigaciones que demuestran limitaciones de crecimiento de la teca en clase de suelo vertisol.

Tabla 24. Comparación IS vs contenido PH y Ca

Parcela	PH	Calcio	IS- Edad 12 años Inferior - superior	
<b>5</b>	5,9	8,7	3,91	12,13
<b>12</b>	6,3	12,1	9,29	17,27
<b>19</b>	6,3	12,8	13,64	18,28
<b>25</b>	6,4	10,1	8,28	16,75
<b>Promedio</b>	5,9	12,4	<b>*12,56</b>	<b>22,61</b>

En la (Tabla 24), se observan valores de índice de IS bajos con menor contenido de calcio en el suelo parcelas 5 y 25, componentes químicos del suelo claves para el buen desarrollo de la teca.

En cuanto la posición fisiográfica Tabla 25 los valores con mayor índice de sitio se presentan en planicie y ladera con relieve cóncavo.

Tabla 25. Fisiografía Vs Índice de sitio (Parcelas con análisis de suelo).

Parcela	Posición	Pendiente %	Relieve	IS- Edad 12 años Inferior - superior	
<b>*5</b>	Ladera	15 – 30	Convexo	3,91	12,13
<b>**12</b>	Ladera	15-30	Cóncavo	9,29	17,27
<b>*19</b>	Planicie	0 - 15	Plano	13,64	18,28
<b>**25</b>	Ladera	0 -15	Convexa	8,28	16,75
<b>Media</b>				<b>*12,56</b>	<b>22,61</b>

Tabla 26. Índice de sitio Vs textura

Parcela	IS- Edad 12 años Inferior - superior		Textura	Composición		
				A %	L %	Ar %
<b>Prom</b>	<b>*12,56</b>	<b>22,61</b>	FAr(Promedio)	34	32	34
<b>*5</b>	3,91	12,13	ArParcela 05	26	28	46
<b>**12</b>	9,29	17,27	FArParcela12	32	34	34
<b>*19</b>	13,64	18,28	FAParcela 19	66	24	10
<b>**25</b>	8,28	16,75	FArAFA(Parcela 25)	56	24	20

El mayor IS, se presenta en suelos con textura Franco Arcillosa y Franco Arenosa, el menor en suelo arcilloso y Franco arcilloso a Franco arenoso, coincidiendo con el análisis de calidad de sitio, realizado antes de establecer la plantación. Tabla 26.

El análisis de correlación lineal no presentó relación estadística significativa entre la pendiente y los IS superior e inferior y los modelos alternos presentan valores de R<sup>2</sup> muy bajos.

Regresión Simple - LOG (Pendiente %) vs. 1/PromIS Inferior

Variable dependiente: LOG (Pendiente %)

Variable independiente: 1/PromIS superior

Lineal:  $Y = a + b \cdot X$

Coeficientes				
	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	3,32614	1,39776	2,37963	0,0446
Pendiente	-0,090321	0,105448	-0,856544	0,4166

Análisis de Varianza					
Fuente	Suma Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0,770896	1	0,770896	0,73	0,4166
Residuo	8,40593	8	1,05074		

Coefficiente de Correlación = -0,289835

R-cuadrada = 8,40046 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = -3,04948 porciento

Error estándar del est. = 1,02506

Error absoluto medio = 0,735305

Estadístico Durbin-Watson = 1,51418 (P=0,2029)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,160307

Tabla 27 Calidad de sitio Vs IS todas las parcelas

Posición	Pendiente Pro %	Relieve	Parcelas	PromIS Inferior	PromIS superior
Ladera	7,5	Convexo	20,25	14,11	23,21
	22,5	Convexo	1,5,8,9,13,15,17,21,29	12,56	21,36
Ladera	32,5	convexo	7,10,27,28	12,7	18,99
Ladera	7,5	Cóncavo	4,16,22,31	13,76	19,65
Ladera	22,5	Cóncavo	11,12,14,18,24,30	13,82	21,63
Cima	7,5	convexo	2	14,16	21,37
Cima	22,5	convexo	3	15,62	19,72
Cima	2,5	Plana	26	13,76	17,60
Planicie	2,5	Cóncavo	6	13,46	18,14
Planicie	2,5	Plana	19,23	13,64	18,94

## Conclusiones

Las variables empleadas para la selección de sitio apto para cultivo de teca antes de realizar la siembra, presentan concordancia con los resultados arrojados por el cálculo de índice de sitio, con base en las ecuaciones de Korf y Richard – Chapman.

La escasa disponibilidad de tierras con IS de sitio excelente, que cumplan los requisitos ambientales

de las especies, muestra la importancia de analizar detalladamente la calidad de sitio a través de los métodos sugeridos. Así se posibilita conocer la capacidad ambiental del área de acuerdo con los requerimientos específicos, determinar deficiencias y la potencial resiliencia. Existen variables fijas como (posición fisiográfica, relieve) que no se pueden transformar y variables dinámicas que permiten niveles de intervención (fertilidad, compactación del suelo).

La estimación de calidad de sitio, a partir del método factores edáficos, topográficos y climáticos, muestra ser una buena herramienta, aplicable para pequeñas y grandes plantaciones con mayores o menores grados de precisión de acuerdo con la disponibilidad tecnológica, científica y económica.

El análisis de calidad de sitio y del índice de sitio, requiere de vastos conocimientos o participación Interdisciplinaria, así como de amplia información sobre la ecología de las especies forestales a elegir, por fortuna la teca es una especie abundantemente investigada en el ámbito mundial.

Las variables empleadas en la selección de sitio antes de la instauración de la plantación fueron suficientes para contribuir a la calificación de la teca como especie adaptable en el lugar.

El inventario para la evaluación del sitio puede ser optimizado con el fin de disminuir costos, especialmente para áreas de reforestación extensa. Las parcelas circulares como plantea Murillo, 1997 y Camacho, 1997) son óptimas para este procedimiento, posibilitan planificar y monitorear otras actividades como el seguimiento a plagas y enfermedades y la determinación de necesidades focales de fertilización.

Sobre la quebrada oquelo en la misma región, en un predio analizado para el cultivo de teca se encontraron tres arboles con aproximadamente 15 años de edad y altura de 11m., el análisis fisicoquímico del suelo evidenció la presencia de arcilla pesada (Vertisol) y deficiencias de drenaje en el 100% del terreno, hecho que confirma para la región un IS mínimo en 11m de altura dominante. Se recomendó otras alternativas para el uso del suelo.

La evaluación del IS mostró diferencia entre calidades de sitio, aún con la fertilización al mes de establecimiento, sugiriendo que para homogenizar el crecimiento se debe realizar fertilización diferenciada para cada sitio (silvicultura de precisión).

El análisis fisicoquímico, debe complementarse con el estudio microbiológico del suelo como complemento al examen de fertilidad, con el fin de identificar la existencia de patógenos persistentes y microfauna benéfica, especialmente cuando se trata de reforestar en tierras utilizadas en agricultura y ganadería.

El estudio fitosanitario del entorno y del predio a reforestar es otro factor a tener en cuenta para seleccionar el sitio y la especie a plantar.

Las conclusiones de independencia entre altura y densidad de siembra en plantaciones de teca, y que los tratamientos de raleo no afectan la altura de los árboles dominantes, confirman la validez de modelar la calidad de sitio y el IS en etapas juveniles, para predecir el futuro crecimiento de las plantaciones y tomar decisiones en el proceso de planeación, manejo y seguimiento.

La conclusión central de la investigación se genera a partir del siguiente análisis comparativo entre la calidad de sitio determinada para Colombia por (Torres, Del Valle y Otros, 2011) y la calidad de sitio encontrada en el presente estudio con los modelos basados en Korf y Richard - Shapman.

Datos promedios resultado de esta investigación, ecuaciones Richard y Chapman Tabla 28 y (Torres, Del Valle y Otros, 2011) Tabla 29.

Tabla 29. IS área de estudio, edad referencia 12 años.

IS Clase	IS		Nº Parcelas	Porcentaje
	Inferior	Superior		
I	16,6285	23,2175	5	16%
II	15,0811	21,3664	9	29,03%
III	14,9481	19,7016	8	25,80%
IV	13,4342	19,2685	5	16%
V	11,9088	19,1606	3	9,60%
VI*	3,9125	12,1331	1	3,22%

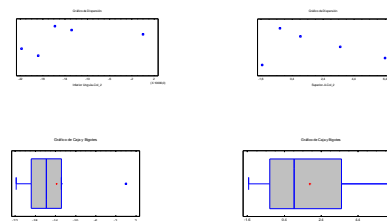
\*Caso excepcional.

Tabla 29. IS Torres et al 2011, edad referencia 12 años

Table 2. Limiting values for site index classes for teak in Colombia separated by intervals of  $\pm 2$  standard deviations around the average site

Site index classes	SI		Number of PSPs
	Lower limit (m)	Upper limit (m)	
I	21.7677	24.7617	4
II	18.7737	21.7677	12
III	15.7797	18.7737	17
IV	12.7857	15.7797	8
V	9.7917	12.7857	3

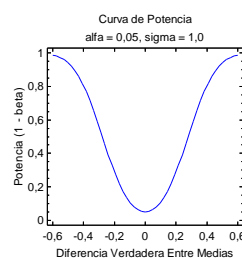
La comparación por métodos estadísticos entre límites inferiores y superiores con el análisis de muestras pareadas indica que los datos provienen de distribuciones normales. Posteriormente con una prueba de hipótesis se realizó la comparación entre medias para los dos rangos de datos



Prueba hipótesis para rangos inferiores

Hipótesis nula:  $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$   
Hipótesis alterna:  $\mu_1 - \mu_2 \neq 0,0$

Dada una muestra de 100 observaciones con una media de 0,0 y una desviación estándar de 1,0 y una segunda muestra de 100 observaciones con una media de 0,0 y una desviación estándar de 1,0, el estadístico t calculado es igual a 0,0. Puesto que el valor-P para la prueba es mayor o igual que 0,05, no puede rechazarse la hipótesis nula con un 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de  $\mu_1 - \mu_2$  soportados por los datos caen entre -0,278886 y 0,278886.

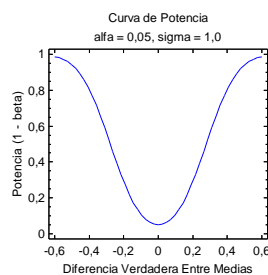


## Prueba de hipótesis rangos superiores

Hipótesis nula:  $\mu_1 - \mu_2 = 0,0$

Hipótesis alterna:  $\mu_1 - \mu_2 < 0,0$

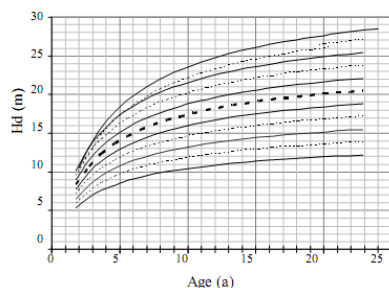
Dada una muestra de 100 observaciones con una media de 0,0 y una desviación estándar de 1,0 y una segunda muestra de 100 observaciones con una media de 0,0 y una desviación estándar de 1,0, el estadístico t calculado es igual a 0,0. Puesto que el valor-P para la prueba es mayor o igual que 0,05, no puede rechazarse la hipótesis nula con un 95,0% de nivel de confianza. El intervalo de confianza muestra que los valores de  $\mu_1 - \mu_2$  soportados por los datos caen entre -0,278886 y 0,278886.



En las (fig. a,b,c,d), se muestran diferentes representaciones gráficas de la calidad de sitio en Colombia, que pueden ser comparados con el resultado de las curvas promedio con mejor ajuste para el área Korf y Richard – Chapman.

Con base en los resultados de la investigación, se recomienda establecer modelos matemáticos que logren determinar la correlación entre índices de sitio y las variables analizadas.

(a) Colombia (Toro, del Valle y otros)



(b) Comparación India - Colombia

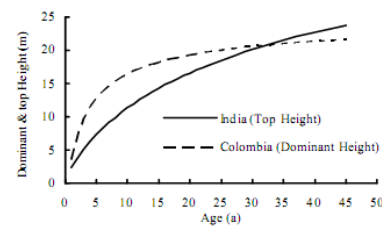
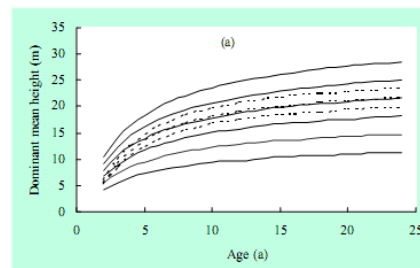
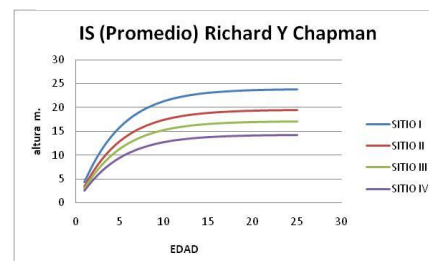


Fig. 6 Comparison between the mean SI curve in the study (thick dark line) and Upadhyay et al. (2005) mean SI curve (thin clear line)

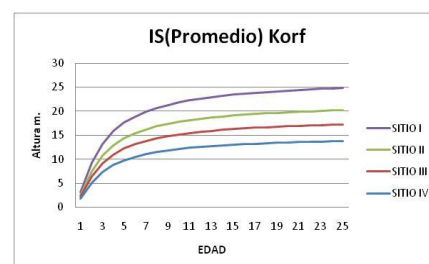
(c) Colombia (Henao, 1982)



(d) Area estudio norte Uraba Choco



(e) Area estudio norte Uraba Choco



## Bibliografía

- Alvarado Alfredo (2006). Nutrición y Fertilización de la Teca. Ingeforest. 12pg.
- Alvarado Alfredo y Raigosa Jaime. (2007) Nutrición y fertilización en regiones tropicales. Centro de Investigaciones Agronómicas Costa Rica, San José, Costa Rica, 368pg.
- Álvarez González, J.G., Barrio Anta M, Diéguez Aranda U y Rojo Alboreca A. 2004. Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior. Cuad.Soc.Esp. Cien. For. 18: 303 – 309 (2004).
- Bedoya Velásquez Nohelia. 2009- 2014 Base de datos Inventario. Fusttal S.A e Informes de campo.
- Bedoya Velásquez Nohelia. 2011 Establecimiento manejo y seguimiento del desarrollo de una plantación de teca en Uraba Colombia. Ponencia 1ra Conferencia Mundial de Teca, Costa Rica.
- Bermejo I, Cañellas I, Miguel AS. 2004. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. Forest Ecology and Management, 189: 97– 110.
- Cáceres Floestal. 2002. Manual do Reflorestamento de teca. Cáceres Matogrosso Brasil.
- Camino Ronnie de. Las Plantaciones de Teca en America Latina: Mitos y realidades/Ronnie de Camino. –Turrialba, C.R: CATIE 2013. 392p. – (Serie Técnica. Informe Técnico/CATIE; no. 397).
- Combatt Enrique y Orozco Jarma. 2004 Caracterización química de suelos agroforestales del Caribe Húmedo Colombiano, Universidad de Córdoba. Facultad de Ciencias Agrícolas. Colombia., 9pg.
- DANE. 2002 – 2003 Censo de plantaciones forestales comerciales de Antioquia.
- DANE. 2006 Síntesis resultado censo de plantaciones forestales – Departamento del Magdalena.
- DANE. 2006 Síntesis resultado censo de plantaciones forestales – Departamento de Córdoba.
- Drechsel, P., Schmall, S. y Zech, W. 1989. Mineral nutrition and the soil properties in young teak plantations in Benin and Liberia. Mitteilung Deutscher Bodenkundlicher Gesellschaft 59:691-696.
- Echeverri RR. 1968. Bases para la formulación de proyectos de reforestación con teca (*Tectona grandis* Lin. F.) en Colombia. Trabajo de Grado, Ingeniería Forestal). Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede, p. 50.
- FAO. 2010 Corporate Document Repository. Journal Unasylva 201- vol. 200051 7pg.
- Fonseca G,W. (2004) Manual para productores de teca (*Tectona grandis* Lf) en Costa Rica. Heredia – Costa Rica.
- Fonseca William Y Chaves William. (1991) *Tectona grandis* L.f. Especie de Árbol de Uso Múltiple en América Latina. Serie Técnica. Informe Técnico 179, CATIE, Costa Rica.
- FUSTTAL. (2010) Plan de Establecimiento y Manejo de Plantaciones Forestales PEMF. 2009, 30pg.
- Henao I.D. 1982. Estudio de rendimientos y rentabilidad en una plantación de teca (*Tectona grandis* L.F.) del departamento de Córdoba, Colombia. Crónica Forestal y del Medio Ambiente, 2(1/2): 1– 75.
- IGAC. 2006. Chocó, Características Geográficas. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 236p.
- Izekor D.N. & Fuwape J.A. 2010. Evaluation of weathering performance of Teak (*Tectona grandis* L.F.) Wood in outdoor application. African Journal of General Agriculture Vol 6, N°4, December 31 2010.
- Jaramillo J. Daniel F. 2011. El suelo. Origen propiedades, espacialidad. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias. pg 543.
- Keogh RM. 1981. Teca (*Tectona grandis*). Procedencias del Caribe: América Central, Venezuela y Colombia. In: Whitmore JL. (ed). Producción de Madera en los Neotrópicos vía Plantaciones, Proc. IUFRO/MAB/U.S. Forest Service Symposium, IUFRO Working Group SI-07-09, Sept.

1980, Inst. Trop For Río Piedras, Puerto Rico, pp. 356– 372.

Keogh RM. 1982. Teak (*Tectona grandis* Linn. f.), provisional site classification chart for the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia. *Forest Ecology and Management*, 4(2): 143– 153.

Krishnapillay Baskaran. 2000. Silviculture and management of teak plantations. Management strategies and ecological requirements for enhanced growth and quality of plantation teak.

Ladrach William. 2009 Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos, Informe especial, Diciembre.

Ladrach William. 2010 Manejo práctico de Plantaciones Forestales en el trópico y subtrópico, Diciembre.

Lara Vásquez Carlos Esteban. 2007. Memorias: Pasantía en Plantaciones Forestales de *Tectona grandis* Linn F. en Ecuador. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Agronomía Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 76pg.

León R. Maria Ines, Martin D. Daiana. 2014. Management of young teak plantations in Panamá – effect of pruning and thinning. Swedish University of agricultural Sciences Thesis no.229. Southern Swedish Forest Research Centre Alnarp. Pg.102.

Malende y H, Temu AB. 1990. Site-index curves and volume growth of teak (*Tectona grandis*) at Mtibwa, Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 31(1/2): 91– 99.

Miller A.D.1969. Provisional yield tables for teak in Trinidad, Trinidad and Tobago, Government Printery, Port of Spain. p. 20.

Montero Mata Marcelino. 1999. Factores de sitio que influyen en el crecimiento de la *Tectona grandis* L.F y *Bombacopsis quinata* (Jacq) Dugand, en Costa Rica. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención Silvicultura. Pg 77.

Mora FA, Meza V. 2004. Comparación del crecimiento en altura de la Teca (*Tectona grandis*)

en Costa Rica con otros trabajos previos y con otras regiones del mundo, U. Nacional, Heredia, Costa Rica. Available at: [www.una.ac.cr/inis/discusión](http://www.una.ac.cr/inis/discusión). [Acceso en 20 Noviembre, 2013].

Moráguez, I. A. 2007 ¿Cómo seleccionar una muestra para una investigación educacional?. La estadística como método de investigación científica, algunos presupuestos teóricos, tipos de muestra, selección de la muestra. Monografias.com publicado martes 23 de enero de 2007. Pg

Murillo Olman y Camacho Pablo. 1997. Metodología para la Evaluación de la Calidad de Plantaciones Forestales Recién Establecidas, *Agronomía Costarricense* 21(2):189-206.

Nunifu TK. 1997. The Growth and Yield of Teak, *Tectona grandis* linn F. Plantations in Northern Ghana. Faculty of forestry Lakehead University Thunder by Ontario

Nunifu TK, Murchinson HG. 1999. Provisional yield models of teak (*Tectona grandis* Linn. F.) plantations in northern Ghana. *Forest Ecology and Management*, 120(1– 3): 171– 178. 113pg.

Pellissari Allan Libanio, Guimarães Paes Pompeu, Behling Alexandre, Ebling Ângelo Augusto. 2014 Cultivo da teca: características da espécie para implantação e condução de povoamentos florestais. Agrarian Academy, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.1, n.01; p. 127 .

Pérez D, Kanninen M. 2005. Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 210(1– 3): 425– 441.

Ramírez C. Alberto. 2011. Patología Forestal. Enfermedades infecciosas y carenciales. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Pg.294.

Restrepo O. Hector Ivan, Orrego S. Sergio Alonso, del Valle A. Jorge Ignacio Y Juan Zalazar U. Carlos. Rendimiento, Turno óptimo forestal y rentabilidad de plantaciones forestales de *tectona grandis* y *Pinus Pátula*. *Inverciencia JAN 2012* Vol 37 N°1, 0378-1844/12/01/014-07.



Rodríguez R. 1968. Estudio alternativo de zonas aptas para teca. (Trabajo de Grado Ingeniería Forestal). Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. p. 55.

Thulasidas P.K., Bhat K. M., y Okuyama T. 2006. Hertwood Color Variation in Home Garden Teak(*Tectona grandis*) From Wet and Dry Localities of Kerala. *Journal of Tropical Forest Science* 18(1):51-54.

Torres Danny A, del Valle Jorge I. Restrepo Guillermo. Site index for teak in Colombia *Journal of Forestry Research* (2011) 23(3): 405–411 DOI 10.1007/s11676-012-0277-x

Trujillo Navarrete. Enrique. (2009). Guía de Reforestación, segunda edición, 253pg.

Vaides E, Ugalde L, Galloway G. 2004. Crecimiento y productividad de teca en plantaciones forestales jóvenes en Guatemala. *Recursos Naturales y Ambiente*, 46– 47: 137– 145.

Vallejo Alvaro. 2012. Curso Modelación del crecimiento de plantaciones forestales. Universidad Nacional de Colombia Medellín. Maestría en Bosques y Conservación ambiental. Presentación Power Point.

Vanclay Jerome K. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forest. Original published in 1994 by CAB international, Wallingford UK as ISBN 0851989136. 329pg.

Weaver Peter. *Tectona grandis* L.f. teca Verbenaceae, Familia de las verbenas. 2000 pg. 17.

Witkamp Martin. Soils as components of ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 2: 85 -110 (Volume publication date November 1971).

Sáenz Ruíz Oscar Andrés. 2012. Evaluación de calidad de sitio (Site Index) parte II. Curso ordenación de plantaciones, Maestría en Bosques y Conservación, Facultad de ciencias agropecuarias, departamento de ciencias forestales.

SPGS. 20013. Teak Silviculture guidelines. Sawlog production grand Scheme (SPGS). Supports the

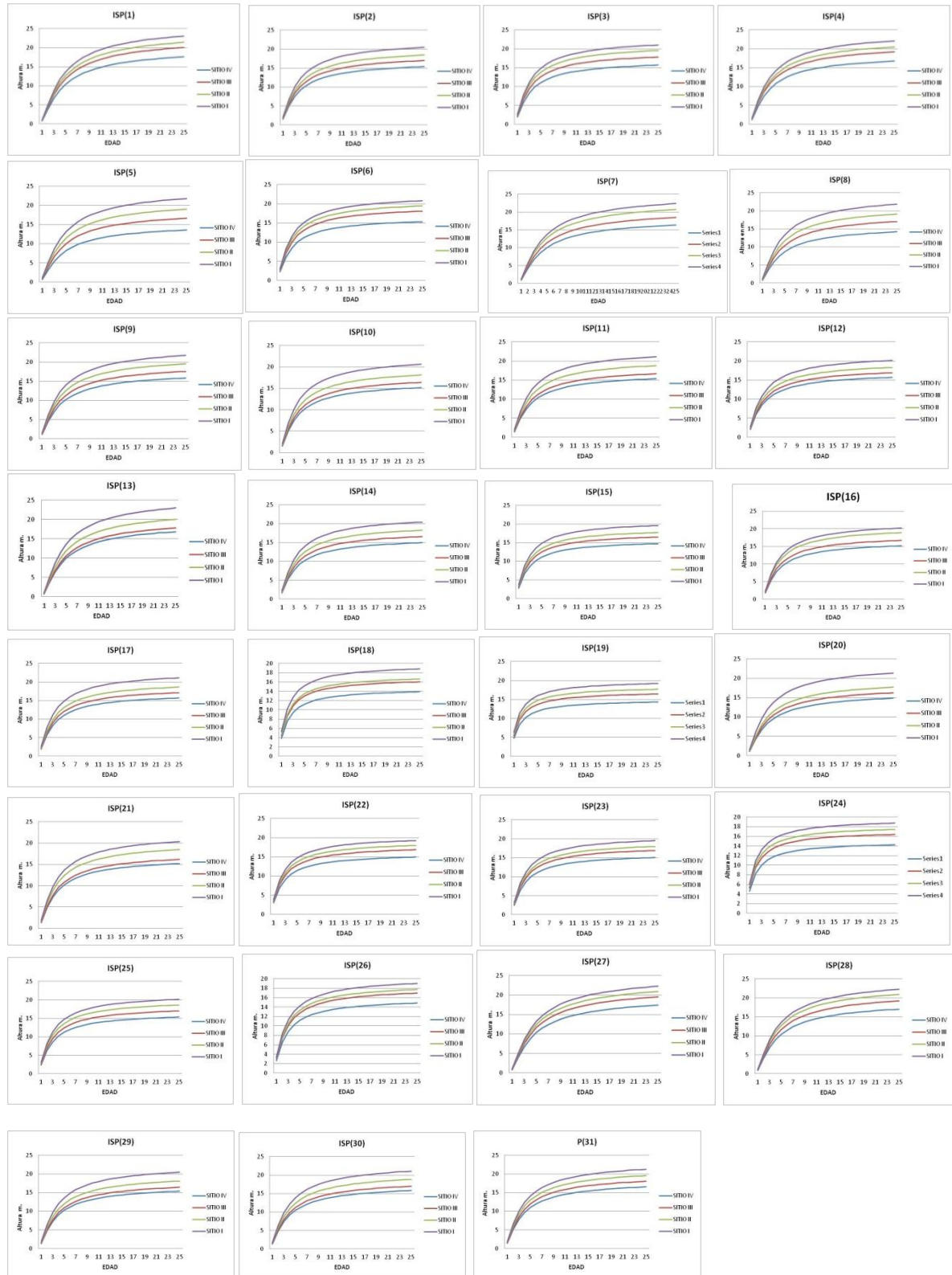
development of forestry industry in Uganda. Versión 1. 16pg.

TAMARIT- URIAS et al. 2014. Ecuaciones dinámicas de calidad de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, Mexico. *Agrociencia* 48:225 -238 febrero, 2014.

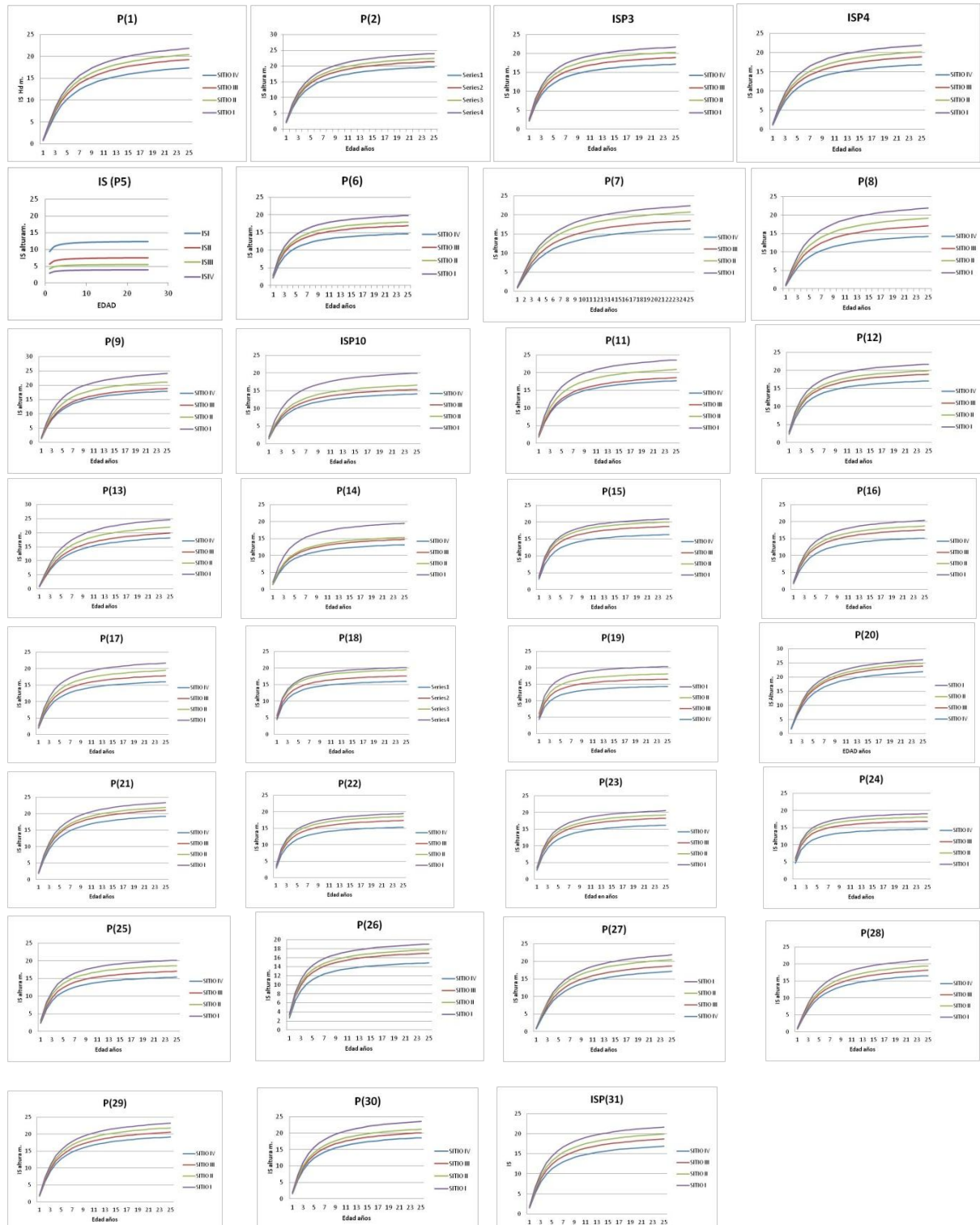
Zuhaidi Yahyana A, et al. 2011. Growth response and yield of plantation grown teak (*Tectona grandis*) after low thinning treatments at Pagoh, Peninsular Malaysia. *Journal of tropical Forest Science* 23(4):453-459(2011). Forest Research Institute Malaysia.

## ANEXO 1

### Modelos por parcela Ajustados con base en ecuación Scumacher



## Modelos por parcela Ajustados con base en ecuación Korf



## Modelos por parcela Ajustados con base en ecuación Richard – Chapman

